

Rec'd PCT/PTO 15 APR 2005

PCT/JP2004/010947

10/531485

19.08.2004

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 1 1 月 6 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 3 7 7 3 5 1
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 3 7 7 3 5 1]

出 願 人 日 本 電 信 電 話 株 式 会 社
Applicant(s):

REC'D 07 OCT 2004

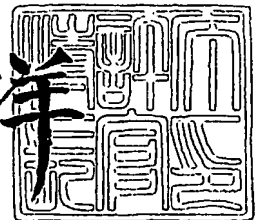
WIPO PCT

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1 (a) OR (b)

2 0 0 4 年 9 月 2 4 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川 洋



出証番号 出証特 2 0 0 4 - 3 0 8 5 9 2 3

【書類名】 特許願
【整理番号】 NTTH156275
【提出日】 平成15年11月 6日
【あて先】 特許庁長官 殿
【国際特許分類】 H01S 3/07
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 神原 浩久
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 湯本 潤司
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 柳川 勉
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 遊部 雅生
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 忠永 修
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 鈴木 博之
【特許出願人】
 【識別番号】 000004226
 【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社
【代理人】
 【識別番号】 100077481
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 谷 義一
【選任した代理人】
 【識別番号】 100088915
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 阿部 和夫
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 013424
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1
 【包括委任状番号】 9701393

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

波長 λ_1 のレーザ光を発生する第 1 のレーザと、波長 λ_2 のレーザ光を発生する第 2 のレーザと、前記波長 λ_1 のレーザ光と前記波長 λ_2 のレーザ光とを入力し、 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ の関係にある差周波の波長 λ_3 を有するコヒーレント光を出力する非線形光学結晶とを含むレーザ光源において、

前記波長 λ_1 は $0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ であり、前記非線形光学結晶は、1 の周期の分極反転構造を有し、

前記波長 λ_2 が $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化すると、前記差周波の波長 λ_3 は、波長 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の間で変化するように構成されていることを特徴とするレーザ光源。

【請求項 2】

前記非線形光学結晶は、導波路構造をさらに有することを特徴とする請求項 1 に記載のレーザ光源。

【請求項 3】

前記第 1 および第 2 のレーザの各々の出力に結合される 2 つの偏波面保持ファイバと、該 2 つの偏波面保持ファイバの出力を合波し、前記非線形光学結晶に結合する合波器とを備えたことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載のレーザ光源。

【請求項 4】

前記第 1 および第 2 のレーザは、半導体レーザであり、

前記 2 つの偏波面保持ファイバは、少なくとも一方がファイバブラッググレーティングを有することを特徴とする請求項 3 に記載のレーザ光源。

【請求項 5】

前記非線形光学結晶に熱的に結合された温度制御素子と、

該温度制御素子を制御して前記非線形光学結晶の温度を制御するための温度制御回路とをさらに備えたことを特徴とする請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載のレーザ光源。

【請求項 6】

レーザ光出射手段とガスセルとレーザ光検出手段とを含み、ガス濃度を光学的に計量する光吸収分析装置において、前記レーザ光出射手段は、

波長 $\lambda_1 = 0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ のレーザ光を発生する第 1 のレーザと、

波長 λ_2 のレーザ光を発生する第 2 のレーザと、

1 の周期の分極反転構造を有し、前記波長 λ_1 のレーザ光と前記波長 λ_2 のレーザ光とを入力し、 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ の関係にある差周波の波長 λ_3 を有するコヒーレント光を出力する非線形光学結晶とを備え、

前記波長 λ_2 が $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化すると、前記差周波の波長 λ_3 は、波長 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の間で変化するように構成されていることを特徴とする光吸収分析装置。

【請求項 7】

被測定ガスの吸収波長および非吸収波長を有する 2 つのレーザ光を出力する 2 波長光源と、前記被測定ガスからの前記レーザ光による各々の散乱光の強度差を利用してガス濃度を計量する 2 波長差分吸収ライダーにおいて、前記 2 波長光源は、

波長 $\lambda_1 = 0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ のレーザ光を発生する第 1 のレーザと、

波長 λ_2 のレーザ光を発生する第 2 のレーザと、

1 の周期の分極反転構造を有し、前記波長 λ_1 のレーザ光と前記波長 λ_2 のレーザ光とを入力し、 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ の関係にある差周波の波長 λ_3 を有するコヒーレント光を出力する非線形光学結晶とを備え、

前記波長 λ_2 が $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化すると、前記差周波の波長 λ_3 は、波長 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の間で変化するように構成されていることを特徴とする 2 波長差分吸収ライダー。

【書類名】明細書

【発明の名称】レーザ光源、光吸収分析装置および2波長差分吸収ライダー

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ光源、光吸収分析装置および2波長差分吸収ライダーに関し、より詳細には、中赤外領域のレーザ光を波長2～3 μm の範囲において可変することができるレーザ光源およびそれを用いた光吸収分析装置と2波長差分吸収ライダーとに関する。

【背景技術】

【0002】

環境保護、安全衛生上の観点から、 NO_x 、 SO_x 、アンモニア系等の環境ガス、水の吸収ピーク、多くの有機系ガスまたは残留農薬の極微量分析技術の確立が強く望まれている。極微量分析技術として、被測定ガスを特定の物質に吸着し、電気化学的手法による定量分析と、被測定物質の固有の光学吸収特性を測定する光学的方法とが一般的である。このうち、光学的手法は、実時間測定が可能であり、測定光の通過する広範囲な領域の観測が可能という特徴を有する。

【0003】

被測定物質の吸収ピークは、原子間結合の振動モードに起因し、主に2 μm から20 μm の中赤外領域にある。しかし、波長2 μm 以上の中赤外領域において、室温で連続発振が可能なレーザは、未だ実用化されておらず、量子カスケードレーザの研究開発が進められているに留まっている。産業上、中赤外光の必要性は高いものの、実用的なレーザ光源がないことが大きな支障になっている。

【0004】

中赤外領域における実用可能な光源が存在しないので、既存の通信用半導体レーザ（0.8～2 μm ）を使用して各種ガスなどの微量分析を行う場合には、基本吸収波長の倍音（＝基本吸収波長の2分の1）、3倍音（＝基本吸収波長の3分の1）における吸収を利用することとなる。倍音であれば必要な感度が得られる場合もあるが、3倍音以上の高次の吸収ピークにおける測定は、吸収量そのものが小さいために検出に限界が生じる。従って、本来の基本吸収波長における測定と比較して、3桁程度の感度低下を招くことになる。

【0005】

従って、環境ガス、危険性を伴うガスなどを分析する際に、高い検出感度を得るためには、中赤外レーザ光源の開発が不可欠である。近年、波長3 μm 付近において中赤外光を発生させ、ガスセンサとして動作を確認したことが報告されている（例えば、非特許文献1参照）。ガスセンサに用いられた光源は、周期変調構造を有するニオブ酸リチウム（ LiNbO_3 ）波長変換素子を用いて、差周波発生により中赤外光を発生する。

【0006】

【非特許文献1】D.Richter, et al., Applied Optics, Vol.39, 4444 (2000)

【非特許文献2】I.B.Zotova et al., Optics Letters, Vol.28, 552 (2003)

【非特許文献3】C.-W.Hsu et al., Optics Letters, Vol.26, 1412 (2001)

【非特許文献4】R.M.Schotland, Proc. 3rd Symp. on Remote Sensing of Environment, 215 (1964)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、周期変調構造を有する波長変換素子からは、1つの固定された波長の中赤外光が発生するのみである。そこで、一度に多種類のガスを検出できるように、波長を可変とするために、（1）1つの波長変換素子の中に多種の周期を設ける（例えば、非特許文献2参照）。（2）Fanout Gratingという構造により周期を変化させる（例えば、非特許文献1参照）。（3）励起光を素子に斜めに入射させて実効的な周期を変える（例えば、非特許文献3参照）などの手法が知られている。

【0008】

これらの方法は、波長を広範囲に掃引することは可能ではあるが、多種の周期を持つ素子を束ねなければならないことから、多くの作業工程が必要となるという問題があった。また、励起光を素子に斜めに入射させる手法では、高効率化を図るべく素子の構造を導波路構造にすることが困難であるという問題もあった。

【0009】

本発明は、このような問題に鑑みてなされたもので、その目的とするところは、中赤外領域のレーザ光を波長 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ の範囲において可変することができるレーザ光源、およびそれを用いた光吸収分析装置と 2 波長差分吸収ライダーを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明は、このような目的を達成するために、請求項 1 に記載の発明は、波長 λ_1 のレーザ光を発生する第 1 のレーザと、波長 λ_2 のレーザ光を発生する第 2 のレーザと、前記波長 λ_1 のレーザ光と前記波長 λ_2 のレーザ光とを入力し、 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ の関係にある差周波の波長 λ_3 を有するコヒーレント光を出力する非線形光学結晶とを含むレーザ光源において、前記波長 λ_1 は $0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ であり、前記非線形光学結晶は、1 の周期の分極反転構造を有し、前記波長 λ_2 が $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化すると、前記差周波の波長 λ_3 は、波長 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の間で変化するように構成されていることを特徴とする。

【0011】

この構成によれば、1 の周期の分極反転構造を有する非線形光学結晶に 2 つのレーザ光を入射し、差周波のレーザ光を発生させ、レーザ光の一方の波長を $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化させることにより、波長 $2.0 \sim 3.1 \mu\text{m}$ の領域で波長を可変することができる。

【0012】

請求項 2 に記載の発明は、請求項 1 に記載の前記非線形光学結晶は、導波路構造をさらに有することを特徴とする。

【0013】

請求項 3 に記載の発明は、請求項 1 または 2 に記載のレーザ光源において、前記第 1 および第 2 のレーザの各々の出力に結合される 2 つの偏波面保持ファイバと、該 2 つの偏波面保持ファイバの出力を合波し、前記非線形光学結晶に結合する合波器とを備えたことを特徴とする。

【0014】

請求項 4 に記載の発明は、請求項 3 に記載の前記第 1 および第 2 のレーザは、半導体レーザであり、前記 2 つの偏波面保持ファイバは、少なくとも一方がファイバブラッググレーティングを有することを特徴とする。

【0015】

請求項 5 に記載の発明は、請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載のレーザ光源において、前記非線形光学結晶に熱的に結合された温度制御素子と、該温度制御素子を制御して前記非線形光学結晶の温度を制御するための温度制御回路とをさらに備えたことを特徴とする。

。

【0016】

請求項 6 に記載の発明は、レーザ光出射手段とガスセルとレーザ光検出手段とを含み、ガス濃度を光学的に計量する光吸収分析装置において、前記レーザ光出射手段は、波長 $\lambda_1 = 0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ のレーザ光を発生する第 1 のレーザと、波長 λ_2 のレーザ光を発生する第 2 のレーザと、1 の周期の分極反転構造を有し、前記波長 λ_1 のレーザ光と前記波長 λ_2 のレーザ光とを入力し、 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ の関係にある差周波の波長 λ_3 を有するコヒーレント光を出力する非線形光学結晶とを備え、前記波長 λ_2 が $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化すると、前記差周波の波長 λ_3 は、波長 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の間で変化するように構成されていることを特徴とする。

【0017】

請求項7に記載の発明は、被測定ガスの吸収波長および非吸収波長を有する2つのレーザ光を出力する2波長光源と、前記被測定ガスからの前記レーザ光による各々の散乱光の強度差を利用してガス濃度を計量する2波長差分吸収ライダーにおいて、前記2波長光源は、波長 $\lambda_1 = 0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ のレーザ光を発生する第1のレーザと、波長 λ_2 のレーザ光を発生する第2のレーザと、1の周期の分極反転構造を有し、前記波長 λ_1 のレーザ光と前記波長 λ_2 のレーザ光とを入力し、 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ の関係にある差周波の波長 λ_3 を有するコヒーレント光を出力する非線形光学結晶とを備え、前記波長 λ_2 が $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化すると、前記差周波の波長 λ_3 は、波長 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の間で変化するように構成されていることを特徴とする。

【発明の効果】

【0018】

以上説明したように、本発明によれば、第1のレーザと、第2のレーザと、1の周期の分極反転構造を有する非線形光学結晶とを備え、レーザの一方の波長を $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化させることにより、中赤外領域のレーザ光を波長 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ の範囲において可变することが可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳細に説明する。非線形光学結晶と2つの励起レーザ光とを用いた差周波発生により中赤外光を発生する方法において、2つの励起レーザ光の波長を λ_1 、 λ_2 と、発生する中赤外光の波長を λ_3 との関係は、

【0020】

【数1】

$$\frac{1}{\lambda_3} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (1)$$

【0021】

で与えられる。ここで、波長 λ_1 、 λ_2 の大小関係は問わないが、便宜上 $\lambda_3 > 0$ とするため、 $\lambda_1 < \lambda_2$ とする。差周波光 λ_3 を効率よく発生させるために、

【0022】

【数2】

$$k_3 = k_1 - k_2 \quad (2)$$

【0023】

となる位相整合条件を満足する必要がある。(2)式において、 k_i ($i=1, 2, 3$)は、非線形結晶内を伝搬する各レーザ光の伝搬定数であり、 k_i における非線形光学結晶の屈折率を n_i とすると、

【0024】

【数3】

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} n_i \quad (3)$$

【0025】

となる。しかし、結晶のもつ分散特性により、一般的には(2)式を満足することは難しい。

【0026】

これを解決する方法として、非線形結晶を周期的に分極反転させた擬位相整合法が用いられている。擬位相整合法には、 LiNbO_3 のような強誘電体結晶が有利であるが、これらの非線形光学定数の符号は自発分極の極性に対応する。この自発分極を、光の伝搬方向に周期 Λ で変調した場合、位相整合条件は、

【0027】

【数4】

$$k_3 = k_1 - k_2 - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4)$$

【0028】

で表される。特定の波長 λ_1 、 λ_2 を励起光として用いた場合には、(1)、(4) 式を同時に満足し、高効率に差周波光 λ_3 を発生することができる。

【0029】

しかしながら、波長 λ_1 、 λ_2 を変化させて異なる波長 λ_3 の差周波光を得ようとする場合、波長 λ_1 、 λ_2 に変動がある場合には、(4) 式を満足することができず、差周波光 λ_3 の強度は低下する。ここで、波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 および周期 Λ と差周波光の発生効率 η との関係について考える。まず、位相不整合量 Δk を

【0030】

【数5】

$$\Delta k = k_3 - k_1 + k_2 + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (5)$$

【0031】

と定義する。このとき、試料長を l とすると、差周波光の発生効率 η は、 Δk と l の積に依存し、

【0032】

【数6】

$$\eta = \eta_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2} \quad (6)$$

【0033】

と表される。(6) 式において、 η_0 は、 $\Delta k = 0$ の時の差周波光の発生効率であり、 LiNbO_3 など結晶の非線形光学定数、励起光強度、試料長などで決まる。したがって、同一の試料においては、周期 Λ が固定されているため、波長 λ_1 または λ_2 の変化は、 Δk を増減させ、発生効率 η の低下をもたらす。与えられた周期 Λ に対して、 $\eta \geq 0.5 \eta_0$ 、すなわち

【0034】

【数7】

$$\frac{\sin^2\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2} \geq 0.5 \quad (7)$$

【0035】

となる波長 λ_1 、 λ_2 の領域を周期 Λ における 3 dB 領域という。この 3 dB 領域を広く取ることができれば、発生効率 η を低下させることなく、差周波光 λ_3 の波長を可変にすることができる。

【0036】

以下の議論では、*z-cut* LiNbO_3 を用い、2つの励起光および差周波光の偏光方向が、共に結晶の *c* 軸方向の場合について取り扱う。このとき、2つの励起光、差周波光の伝搬特性は、異常光屈折率 n_e で決まる。 n_e は、セルマイヤー方程式より、

【0037】

【数 8】

$$n_e^2(\lambda) = 4.5567 - 2.605 \times 10^{-7} T^2 + \frac{0.097 + 2.7 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.201 + 5.4 \times 10^{-8} T^2)^2} - 2.24 \times 10^{-2} \lambda^2 \quad (8)$$

【0038】

与えられる。ここで、 T は温度 (K)、波長 λ の単位は μm である。

【0039】

図1に、周期 Λ と仮定し、波長 λ_3 を助変数として求めた 3 dB 領域を示す。波長 λ_1 、 λ_2 に対する 3 dB 領域は、(1)、(5) および (7) 式より与えられる。室温において、(1) 式から計算される差周波光波長 $\lambda_3 = 2.0 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 、 $3.0 \mu\text{m}$ 、 $3.5 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m}$ 、 $4.5 \mu\text{m}$ 、 $5.0 \mu\text{m}$ 、 $5.5 \mu\text{m}$ 、 $6.0 \mu\text{m}$ を与える波長 λ_1 、 λ_2 の関係を点線で示した。また、周期 $\Lambda = 26 \mu\text{m}$ 、 $27 \mu\text{m}$ 、 $28 \mu\text{m}$ 、 $29 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ に対する 3 dB 領域を、(5) および (7) 式より求め、それぞれの領域をハッチングによって示した。素子長は 10 mm とした。

【0040】

完全に位相整合を満足する $\eta = \eta_0$ は、3 dB 領域のほぼ中央部に存在する。すなわち、周期 Λ の周期的分極反転構造を有する LiNbO_3 における差周波光発生では、周期 Λ の擬似位相整合素子を用いる。所望の差周波光 λ_3 を得る場合、 $\eta = 0.5 \eta_0$ となる波長 λ_1 、 λ_2 は、(1)、(5) および (7) 式から得られ、周期 Λ の 3 dB 領域と所望の差周波光 λ_3 を与える (1) 式の曲線との交点で与えられることがわかる。

【0041】

一例として、周期 $\Lambda = 28 \mu\text{m}$ の周期分極反転構造を有する LiNbO_3 を用い、波長 $\lambda_3 = 3.0 \mu\text{m}$ の差周波光を発生させる場合を考える。波長 $\lambda_3 = 3.0 \mu\text{m}$ の点線と、周期 $\Lambda = 28 \mu\text{m}$ の 3 dB 領域とが交差する波長 λ_1 、 λ_2 の領域 (図中 A の \bigcirc で囲った部分) は、 $\eta = 0.5 \eta_0$ となる。

【0042】

次に、具体的な条件を示す。差周波光発生における発生強度は、2つの励起光強度の積に比例する。したがって、これまで報告された例では、高強度が得られやすい Nd:YAG レーザ (波長 $1.064 \mu\text{m}$) が主に用いられている。ここでは、波長 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ とし、波長 λ_2 を変化させることにより、波長可変な差周波光 λ_3 を実現する場合を考える。周期 Λ の周期的分極反転構造を有する LiNbO_3 の試料を用いた場合、図1においてハッチングで示した周期 Λ の 3 dB 領域と、波長 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ の直線 B とが交差する領域の波長 λ_2 において $\eta = 0.5 \eta_0$ となる。

【0043】

図2に、周期 $\Lambda = 27 \mu\text{m}$ 、波長 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ とした時の波長 λ_2 に対する規格化変換効率 η/η_0 を示す。 $\eta = 0.5 \eta_0$ を満足する波長 λ_2 の幅は、 2 nm 程度しかなく、したがって、差周波光 λ_3 の波長可変量は、 20 nm 程度に制限される。周期 Λ を $28 \mu\text{m}$ 、 $29 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ に変えた場合も、波長 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ とすると、いずれの場合でも、 $\eta = 0.5 \eta_0$ を満足する波長 λ_2 の幅は、 2 nm 程度しかなく、差周波光 λ_3 の波長可変量も同じように制限される。

【0044】

しかし、図1を見ると、波長 λ_1 を固定し波長 λ_2 を変化させれば、差周波光 λ_3 の波長可変域を大幅に拡大できる領域があることが分かる。すなわち、波長 λ_1 が一定となる直線と周期 Λ の 3 dB 領域とが、より広範囲で交差すれば差周波光 λ_3 の波長可変域幅が飛躍的に増大する。周期 $\Lambda = 25.5 \mu\text{m} \sim 29 \mu\text{m}$ の 3 dB 領域は、波長 $\lambda_1 = 0.9 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ ではほぼ縦軸に平行になっており、この波長 $0.9 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ 領域で波長 λ_1 が一定となる直線と広範囲で交差している。すなわち、単一の周期 Λ を有する分極反転構造 LiNbO_3 を用いても、波長 λ_1 を $0.9 \mu\text{m} \sim 1.0 \mu\text{m}$ の範囲で固定し、波長 λ_2 を $1.3 \mu\text{m} \sim 1.8 \mu\text{m}$ の領域で変化させると、差周波光 λ_3 は、波長 $1.3 \mu\text{m} < \lambda_3 < 1.8 \mu\text{m}$ のほぼすべての範囲で位相整合条件を満足し、高効率で波長

を可変にすることができる。

【0045】

例えば、周期 $\Lambda = 27 \mu\text{m}$ 、波長 $\lambda_1 = 0.94 \mu\text{m}$ としたとき、波長 λ_2 に対する規格化変換効率、波長 $\lambda_2 > 1.43 \mu\text{m}$ の領域において $\eta = 0.5 \eta_0$ となり、ほぼ波長 $2 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ の広い波長範囲で差周波光の発生が可能である。なお、波長 $\lambda_3 = 3 \mu\text{m}$ 近傍においては、後述するように、温度調整により 1 つの周期 Λ で発生させることが可能となる。

【0046】

以下、本発明を実施例に基づいて詳細に説明するが、本発明は、下記実施例に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において、種々変更可能であることは言うまでもない。

【実施例 1】

【0047】

図 3 に、本発明の一実施形態にかかる中赤外光を発生するレーザ光源を示す。レーザ光源は、波長 λ_1 の半導体レーザ ($\lambda_1 = 0.94 \mu\text{m}$ とする) 10 と、波長 λ_2 ($\lambda_2 = 1.45 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 帯で波長可変とする) の半導体レーザ 11 と、半導体レーザ 10, 11 の出力光を合波する合波器 18 と、合波された出力光を入力し差周波光、すなわち中赤外光を発生する 1 の周期の分極反転構造を有する LiNbO_3 結晶バルク 21 とを備えている。半導体レーザ 10 の出力は、結合レンズ系 12, 13 と偏波面保持ファイバ 16 とを介して合波器 18 に接続される。半導体レーザ 11 の出力は、結合レンズ系 14, 15 と偏波面保持ファイバ 17 とを介して合波器 18 に接続される。

【0048】

半導体レーザ 10 は、その端面 10A に 90% 以上の高反射膜が形成され、反対側の端面 10B は、反射率 2% 以下の低反射膜が形成されている。偏波面保持ファイバ 16 には、ファイバブラッググレーティング 16A を設けて、波長安定性を向上させている。また、偏波面保持ファイバ 17 には、必要に応じて、その途中にファイバアンプを結合して半導体レーザ 11 の出力光を増大させることもできる。

【0049】

また、合波器 18 の出力は、光ファイバ 19 と結合レンズ系 20 とを介して LiNbO_3 結晶バルク 21 に接続される。なお、 LiNbO_3 結晶バルク 21 の出力は、中赤外光である出力光を測定するために結合レンズ系 22, 24 と光ファイバ 23 とを介して分光器 25 に接続してある。

【0050】

図 1 の直線 C で示したように、波長 $\lambda_1 = 0.94 \mu\text{m}$ 帯とすれば、 LiNbO_3 結晶バルク 21 の周期 Λ が $27 \mu\text{m}$ のとき、半導体レーザ 11 の波長を $1.45 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の範囲で変化させても、1 つの周期 Λ で、上述の 3 dB 領域を得ることができる。言い換えれば、1 つの周期 Λ により、広い波長範囲で中赤外光を得ることができる。波長 $\lambda_1 = 0.94 \mu\text{m}$ 帯において、波長 λ_2 を $1.45 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の範囲で変化させると、発生する中赤外光の波長 λ_3 は、 $2.3 \sim 2.7 \mu\text{m}$ の広い範囲に及ぶことが分かる。

【0051】

図 4 に、実施例 1 における 3 dB 領域を示す。縦軸は中赤外光強度、横軸は半導体レーザ 11 の波長 λ_2 である。図 1 の計算結果から予想される通り、1 つの周期 Λ からなる LiNbO_3 結晶バルク 21 により、 $1.45 \mu\text{m} < \lambda_2 < 1.60 \mu\text{m}$ の広い波長範囲で、ほぼ一定の強度を持つ中赤外光を得ることができる。半導体レーザ 11 の出力は、すべての波長域で一定である。 $1.45 \mu\text{m} < \lambda_2 < 1.60 \mu\text{m}$ の変化は、中赤外光の $2.7 \mu\text{m} > \lambda_3 > 2.3 \mu\text{m}$ の変化に対応する。発生した中赤外光の波長は、分光器 25 により確認する。本実施例では、素子長 10 mm の LiNbO_3 結晶バルク 21 を使ったが、変換効率は全ての波長域で 1%/W であった。

【0052】

本実施例のような差周波発生実験を行う際には、2 つの励起光の偏光方向が一致すると

きに最大の中赤外光が発生する。ここで、半導体レーザ10の光方向を固定し、半導体レーザ11の偏光方向を、角度 θ だけ傾けたとすると、中赤外光の光強度 I_3 は、半導体レーザ10の光強度を I_1 とし、半導体レーザ11の光強度を I_2 とすると、

【0053】

【数9】

$$I_3 \propto I_1 I_2 \cos^2 \theta \quad (9)$$

【0054】

となる。(9)式は、中赤外光の発生を確認する手段となる。図5に、実施例1において出力された中赤外光の偏波依存性を示す。実験結果は、計算によるものとほぼ一致することが確かめられた。

【実施例2】

【0055】

実施例1では、出力された中赤外光の波長範囲は、 $2.3 \sim 2.7 \mu\text{m}$ であったが、 LiNbO_3 結晶の周期 Λ を変えることにより、波長域をさらに拡大することができる。実施例2では、図3に示した LiNbO_3 結晶バルク21の周期 Λ を $26 \mu\text{m}$ とした。半導体レーザ10は、波長 $0.91 \mu\text{m}$ 帯において微少範囲で波長可変な装置とし、半導体レーザ11は、波長 $1.30 \sim 1.68 \mu\text{m}$ 帯の広い範囲で波長可変な装置とした。

【0056】

3dB領域は、1つの周期 Λ からなる LiNbO_3 結晶バルク21により、 $1.30 \mu\text{m} < \lambda_2 < 1.68 \mu\text{m}$ の広い波長範囲で、ほぼ一定の強度を持つ中赤外光を得ることができる。波長 λ_2 を $1.30 \sim 1.68 \mu\text{m}$ で変化させたことから、中赤外光の波長 λ_3 は、 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ を得ることができた。本実施例では、素子長 10mm の LiNbO_3 結晶バルク21を使ったが、変換効率は全ての波長域で $1\%/W$ であった。

【0057】

なお、 LiNbO_3 結晶は、(8)式から分かるように、屈折率が温度とともに変化するので、それに伴って実効的な周期 Λ も変わる。したがって、 LiNbO_3 結晶の温度を微細に調整すれば、1つの周期 Λ を有する LiNbO_3 結晶で差周波発生を行っても、実効的な1つの周期 Λ を変えることができるので、高い変換効率を保つことができる。図1に示したとおり、半導体レーザ10の波長を固定したままでは、変換効率を高く保てない領域(例えば、周期 $\Lambda = 28, 29 \mu\text{m}$ のように、特性曲線が縦軸に完全に平行でない領域)がある。そこで、 LiNbO_3 結晶バルク21の温度を調整し、常に、半導体レーザ10の波長に対する実効的な周期 Λ を最適化し、高い変換効率を保つことができる。

【0058】

実施例2においては、適当な温度調整の下、周期 Λ を $25.5 \sim 29.3 \mu\text{m}$ の間を $0.1 \mu\text{m}$ 間隔で変え、周期 Λ を有する LiNbO_3 結晶バルク21を用いて差周波を発生させる。その結果、周期 Λ 毎に波長 λ_1 を波長 $0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の範囲で適当に選び、これに合わせて、波長 λ_2 を $1.27 \sim 1.80 \mu\text{m}$ の範囲で変化させると、中赤外光の波長 λ_3 を $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の範囲で連続的に得ることができる。ただし、周期 Λ が $28.5 \mu\text{m}$ を越えたところから、図1に示したとおり、特性曲線が縦軸に平行な部分が減少することから、一定強度の差周波光を得るために必要な温度制御の寄与が次第に大きくなった。温度変化 100 度は、波長 λ_1 の $0.005 \mu\text{m}$ の変化分に相当した。

【実施例3】

【0059】

波長変換素子をバルク型の LiNbO_3 結晶から導波路型に変えて、実施例1, 2と同様の構成とすると、より高効率に中赤外光を得ることができる。実施例3では、図3に示した LiNbO_3 結晶バルク21を導波路素子に変えた光学系を用いる。 LiNbO_3 導波路の素子長は 10mm 、コアの断面サイズは $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 、周期 Λ は $26 \mu\text{m}$ とした。半導体レーザ10は、 $0.91 \mu\text{m}$ 帯の微少範囲で波長可変とし、半導体レーザ11は、 $1.3 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 帯の広い範囲で波長可変とした。

【0060】

導波路素子における3 dB領域は、適当な温度調整の下、波長 $\lambda_1 = 0.91 \mu\text{m}$ 帯に対して、 $1.3 \mu\text{m} < \lambda_2 < 1.65 \mu\text{m}$ の広い波長範囲で、ほぼ一定の強度を持つ中赤外光 λ_3 が波長範囲 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ において得られる。変換効率は全ての波長域で向上し、バルク素子に比べて、2桁の向上が見られた。

【0061】

また、周期 Λ を $25.5 \sim 29.3 \mu\text{m}$ の間を $0.1 \mu\text{m}$ 間隔で変え、適当な温度調整の下、周期 Λ を有する LiNbO_3 導波路を用いて中赤外光を発生させる。その結果、周期 Λ 毎に波長 λ_1 を $0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の範囲で適当に選び、これに合わせて、波長 λ_2 を $1.27 \sim 1.80 \mu\text{m}$ で変化させると、中赤外光の波長 λ_3 を $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の範囲で連続的に得ることができる。

【実施例4】

【0062】

図1に示したように、位相整合曲線は、急激に湾曲を生じる領域がある。この領域を利用すると、波長可変性の点から大きなメリットはない。しかしながら、差周波発生を行う際に、2つの励起光の波長安定性における許容量が大きく改善され、特に短波長側の半導体レーザの許容量の改善に効果をもたらす。例えば、図1において、周期 $\Lambda = 27 \mu\text{m}$ の場合、半導体レーザ11の λ_2 が $1.45 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の領域では、波長 λ_2 が変動しても3 dB領域から外れることはないが、半導体レーザ10の波長 λ_1 は、その僅かな変動により3 dB領域から外れる原因となる。しかし、波長 λ_2 が $1.35 \mu\text{m}$ 近辺の湾曲部では、半波長側の波長 λ_1 にも、3 dB領域に対する波長変動の許容量が2倍に増えるという利点が生じる。 LiNbO_3 結晶バルク21の温度調整量も減少する。ここで、波長 λ_2 に対しては、許容量は減少しているが、それでも通常の市販されているレーザ光源の安定性から見れば十分な幅である。

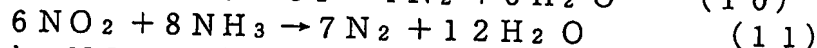
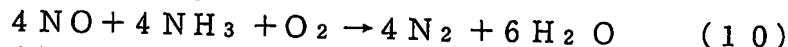
【0063】

実施例4では、半導体レーザ10の端面10A、10Bにおける反射膜と偏波面保持ファイバ16のファイバブラッググレーティング16Aとを取り除いた光学系を用いる。ファイバブラッググレーティングは、設計された波長の光を選択的に得ることができるデバイスであり、実施例1では、これによって波長 λ_1 の変動を抑えていた。したがって、ファイバブラッググレーティング16Aを除くと、安定な3 dB領域を得るのが難しい場面もある。しかしながら、実施例4では、このような波長を安定化するための構成を有さなくても、3 dB領域を外れないで十分安定な動作をすることができる。ここで、 LiNbO_3 結晶バルク21の周期 Λ を $27 \mu\text{m}$ とし、半導体レーザ10の波長を $0.945 \mu\text{m}$ とし、半導体レーザ11の波長を $1.35 \mu\text{m}$ とした。

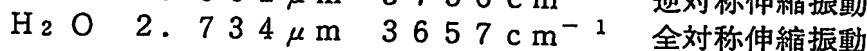
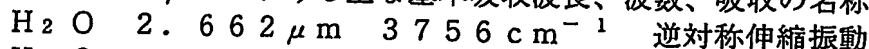
【実施例5】

【0064】

本発明にかかる中赤外光を発生するレーザ光源によれば、環境ガスの NO_x を精度よく検出することができる。 NO_x ガスの基本吸収は、波長 $5 \mu\text{m}$ 以上であるため、 LiNbO_3 の吸収特性（波長 $5.4 \mu\text{m}$ 以上の光は透過し難い）を考えると、下記反応式を利用するのが便利である。



すなわち、 NO_x は、触媒下において NH_3 により分解されることから、消費された NH_3 、または新たに発生する H_2O を調べることにより、 NO 、 NO_2 濃度を間接的に算出することができる。また、 NO 、 NO_2 の基本吸収の倍音が、波長 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ にあることを活用して検出することもできる。そこで、波長 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ において波長を可変することができるレーザ光源があれば、上述のガスの吸収を一括して調べることができる。各ガスの波長 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ における主な基本吸収波長、波数、吸収の名称は、以下の通りである。



NH ₃	2.904 μm	3444 cm ⁻¹	二重縮重振動	
NH ₃	2.997 μm	3337 cm ⁻¹	全対称振動	
NO	5.330 μm	1876 cm ⁻¹	逆対称伸縮振動	倍音 = 2.665 μm
NO ₂	6.180 μm	1618 cm ⁻¹	逆対称伸縮振動	倍音 = 3.090 μm

【0065】

図6に、本発明の一実施形態にかかる光吸収分析装置を示す。特に、NO_xガス濃度を検出するための光学系を示す。被測定ガスが封入されるガスセル44は、両端にある反射鏡を利用して、最大18mの光路長を有する。反応ガスは、ポンプ45によりガス除去管46から、ガスセル44に導かれ、ポンプ47によりガス排気管48に排出される。ポンプを活用するとガスセル内の圧力を変えることができる。ガス除去管46は、(10)式または(11)式の反応により、NO_xが除去される。検出器49は、中赤外光用のHgCdTeダイテクタである。

【0066】

レーザ光源は、波長λ₁の半導体レーザ(λ₁=0.91 μm帯固定)30と、波長λ₂(λ₂=1.28~1.46 μmで波長可変とする)の半導体レーザ31と、半導体レーザ30、31の出力光を合波する合波器38と、合波された出力光を入力し、中赤外光を発生する周期Λ=26 μmのLiNbO₃結晶バルク41とを備えている。半導体レーザ30の出力は、結合レンズ系32、33と偏波面保持ファイバ36とを介して、半導体レーザ31の出力は、結合レンズ系34、35と偏波面保持ファイバ37とを介してそれぞれ合波器38に接続される。

【0067】

半導体レーザ30は、その端面30Aに90%以上の高反射膜が形成され、反対側の端面30Bは、反射率2%以下の低反射膜が形成されている。偏波面保持ファイバ36には、ファイバブラッググレーティング36Aを設けて、波長安定性を向上させている。合波器38の出力は、光ファイバ39と結合レンズ系40とを介してLiNbO₃結晶バルク41に接続される。LiNbO₃結晶バルク41の出力は、結合レンズ系42と光ファイバ43とを介してガスセル44に接続される。

【0068】

実施例5では、最初に、NO₂ガスの除去に伴う計測結果を示す。測定は、下記の3ステージに分けて行う。

- (i) 触媒もNH₃ガスも与えないで、NO₂ガスのみをガス除去管に導入する
- (ii) 触媒を与えずNH₃ガスを与えて、NO₂ガスをガス除去管に導入する
- (iii) 触媒とNH₃ガスとを与えて、NO₂ガスをガス除去管に導入する

【0069】

ステージ(i)では、半導体レーザ31の波長を調整し、波長を1.290 μmにしたところ、化学反応が起こっていないことに相応し、波長3.090 μmにおいてNO₂の逆対称伸縮振動の倍音吸収を検出することができる。一方で、半導体レーザ31の波長を再度調整しNH₃やH₂Oの吸収波長に合わせても、これら二つの吸収は観測されない。

【0070】

ステージ(ii)では、NH₃を与えても触媒がないので化学反応が進まず、未反応のNO₂とNH₃の吸収を観測することになる。ところが、ステージ(iii)になると、触媒が与えられているので化学反応が進み、NO₂が除去されNH₃が消費されることから、NO₂とNH₃の吸収が減少し始め、代わって、新たに生成したH₂Oの吸収が観測されるようになる。さらに、多くのNH₃を加えた場合、NO₂の吸収が完全に消失し、過剰に加えたNH₃と新たに生成したH₂Oの吸収が増大するようになる。

【0071】

ここで、(11)式を利用すると、ステージ(iii)において、NO₂の濃度を定量的に計量することができる。すなわち、多量のNH₃を加えていくとNO₂の吸収が減少し、過剰に加えられたNH₃と新たに生成したH₂Oの吸収が出現する。NO₂の吸収がゼロになる点、過剰となったNH₃の吸収が出始める点、または、H₂Oの吸収強度が増大

した後一定値をとり始める点の何れかまでに加えた NH_3 量を計れば、(11) 式により、ガス除去管に含まれていた NO_2 の濃度を算出することができる。

【0072】

NH_3 濃度は、加えた量だけを測ればよいから、正確に計量することができる。実施例 5 では、バルク長 10 mm の LiNbO_3 結晶バルク 41 を用いた場合、 NO_2 の最少検出濃度が、100 Torr において、1 ppm である。また、10 mm 長の導波路を用いた場合には、 NO_2 の最少検出濃度は、10 ppb オーダにまで低減させることができた。

【0073】

NO ガスの検出も、(10) 式を利用すると便利であり、ガス除去管 46 に NH_3 と O_2 を加えて行き、 NO の吸収がゼロになる点、過剰の NH_3 の吸収が始める点、または、 H_2O の吸収強度が増大した後一定値をとり始める点での NH_3 量を計れば、 NO の濃度を算出できる（ここでは、 O_2 の吸収は見ない）。ただし、 NO の倍音吸収と H_2O の逆対称伸縮振動吸収の波長が極めて近いので、 H_2O の全対称伸縮振動吸収と NH_3 の吸収とを主に活用することになる。 NO ガスの最少検出濃度も NO_2 とほぼ同等であった。

【0074】

なお、実施例 5 では、 LiNbO_3 結晶バルク 41 に対して 1 つの周期 Λ だけを用意すればよいことから、測定は極めて簡便、迅速である。また、 NO 、 NO_2 ガスが、存在するか否かを調べるだけであれば、吸収ピークの有無だけを調べ、 NH_3 量を計量しなくてもよいことから、さらに測定は簡便、迅速となる。

【実施例 6】

【0075】

波長 2 ~ 3 μm において波長可変の中赤外領域のレーザ光源を用いて、 NO_x 、 CO_2 、 CO などのガス計を構成すると、一台の光源で多種類のガス濃度を測定することができる。ここでは、 NO 、 NO_2 、 CO 、 CO_2 の 4 種のガスを同時に検出することについて述べる。対象となる各ガスの基本吸収波長、波数、吸収の名称、倍音吸収波長は、以下の通りである。

CO_2	4.257 μm	2349 cm^{-1}	逆対称伸縮振動	倍音 = 2.129 μm
CO	4.666 μm	2143 cm^{-1}	伸縮振動	倍音 = 2.333 μm
NO	5.330 μm	1876 cm^{-1}	逆対称伸縮振動	倍音 = 2.665 μm
NO_2	6.180 μm	1618 cm^{-1}	逆対称伸縮振動	倍音 = 3.090 μm
H_2O	2.662 μm	3756 cm^{-1}	逆対称伸縮振動	
H_2O	2.734 μm	3657 cm^{-1}	全対称伸縮振動	
NH_3	2.904 μm	3444 cm^{-1}	二重縮重振動	
NH_3	2.997 μm	3337 cm^{-1}	全対称振動	

本実施例では、下記の 3 ステージを通して、各ガスを順番に除去して行き、ガス濃度を計量した。構成は、図 6 に示した実施例 5 と同じである。

(a) 触媒や除去用ガスを与えないで、 NO 、 NO_2 、 CO_2 、 CO をガス除去管に導入する

(b) 触媒と NH_3 、 O_2 ガスを与えて、 NO 、 NO_2 を除去する

(c) 上記 (b) で NO 、 NO_2 が除去された後、 O_2 ガスを与えて、 CO を燃焼させる
ステージ (a) では、ガス除去管 46 において、何の化学反応も進まないのので、波長 2 ~ 3 μm において、 NO 、 NO_2 、 CO_2 、 CO ガスの倍音吸収が観測される。

【0076】

ステージ (b) になると、 NO 、 NO_2 が除去され、 NH_3 が消費されることに呼応して、これらの吸収が減少し始め、代わって、新たに生成した H_2O の吸収が観測されるようになる。さらに、過剰の NH_3 、 O_2 を加えた場合、 NO 、 NO_2 の吸収が完全に消失し、過剰の NH_3 と新たに生成した H_2O の吸収が増大するようになる（ここでも、 O_2 の吸収は見ない）。ステージ (c) では、下記反応式 (12) に従って、 CO が燃焼させるに連れて、 CO_2 の吸収が増大することになる。



【0077】

ステージ (b) において、NO と NO₂ の合計濃度を定量的に計量することができる。すなわち、多量の NH₃、O₂ を加えていくと NO、NO₂ の吸収が減少し、過剰に加えられた NH₃ と新たに生成した H₂O の吸収が出現する。NO、NO₂ の吸収がゼロになる点、過剰となった NH₃ の吸収が開始する点、または、H₂O の吸収強度が増大した後一定値をとり始める点の何れかまでに加えた NH₃ 量を計れば、(10)、(11) 式により、ガス除去管に含まれていた NO と NO₂ の合計濃度を算出することができる。NO、NO₂ の個別の濃度を知るには実施例 5 に拠ればよい。

【0078】

ステージ (c) においては、CO の濃度を計量することができる。すなわち、O₂ 存在下、CO を燃焼させると CO₂ が生じるから、O₂ を加えて行って、CO の吸収が消失する点、または CO₂ の吸収が増大しピークを迎えた後一定値を取り始める点のいずれかに加えた O₂ 量を計れば、(12) 式により、ガス除去管に含まれていた CO の濃度を算出することができる。O₂ は加えた量だけを測ればよいから、正確に計量することができる。実施例 6 では、バルク長 10 mm の LiNbO₃ 結晶バルク 41 を用いた場合、NO₂ の最少検出濃度が、100 Torr において、1 ppm であった。また、10 mm 長の導波路を用いた場合には、NO₂ の最少検出濃度は 10 ppb オーダにまで低減させることができた。

【実施例 7】

【0079】

本発明にかかる中赤外光を発生するレーザ光源を用いれば、波長 2~3 μm に吸収のある NO_x、CO₂、CO などのガスを遠隔操作によって検出することができる。実施例 7 では、2 波長差分吸収ライダー (例えば、非特許文献 4 参照) により環境ガスの検出を行った。2 波長差分吸収ライダーは、被測定ガスの吸収波長と非吸収波長とを用いるが、吸収波長のライダー信号は、非吸収波長に比べて減衰が大きいことから、この 2 波長の信号差を利用してガス分子の濃度を計量することができる。

【0080】

実施例 7 では、NO、NO₂、CO、CO₂ の 4 種のガスを、2 波長差分吸収ライダーにより検出する。各ガスの基本吸収波長、波数、吸収の名称、倍音吸収波長は、以下の通りである。

CO ₂	4.257 μm	2349 cm ⁻¹	逆対称伸縮振動	倍音 = 2.129 μm
CO	4.666 μm	2143 cm ⁻¹	伸縮振動	倍音 = 2.333 μm
NO	5.330 μm	1876 cm ⁻¹	逆対称伸縮振動	倍音 = 2.665 μm
NO ₂	6.180 μm	1618 cm ⁻¹	逆対称伸縮振動	倍音 = 3.090 μm

測定にあたっては、なるべく近い時間に 2 波長の測定を行うことが正確なデータを得るために必要であるが、本発明にかかるレーザ光源は、瞬時に目的の 2 波長を出すことができ、LiNbO₃ 結晶に対して 1 つの周期 Λ だけを用意すればよいことから、波長 2~3 μm 帯での 4 種ガスの測定も極めて迅速に行える。

【0081】

図 7 に、2 波長差分吸収ライダーの測定系を示す。2 波長差分吸収ライダー 60 は、レーザ光出射部 60A とレーザ光検出部 60B とからなる。レーザ光出射部 60A に含まれるレーザ光源は、素子長 10 mm の LiNbO₃ 結晶導波路を用い、周期 Λ = 26 μm とした。半導体レーザ 30 の波長は、0.91 μm 帯とし、半導体レーザ 31 の波長は、1.28~1.46 μm の間において可変とした。適当な温度調整の下、波長 2~3 μm の中赤外光をレーザ出射口 61 より出力する。

【0082】

中赤外光 64 は、検出ガス 66 に向けて出射され、検出ガス 66 からの散乱光 (レイリー散乱、ミー散乱) 65 をレーザ光検出部 60B 内部にある反射鏡 62 により受光する。集光された光は、HgCdTe ダイテクタである検出器 63 により検出される。

【0083】

測定において、非吸収波長としては、検出ガスの倍音吸収波長から2～10nm低波長側に設定する。発生する中赤外光の強度が大きいほど測定可能な距離が伸びるため、中赤外光強度は、10mWの高出力とする。距離3メートル離れた空間（＝直径1メートル以上の球状空間）に、上述の4つのガスを濃度1ppmで拡散させると、全てのガスの吸収を観測することができる。ガス濃度を10ppmに上昇させると、計測する空間が10メートル離れても検出することができる。

【実施例8】

【0084】

本発明にかかる中赤外光を発生するレーザ光源は、農作物に残留する農薬の検出にも有益である。農薬に含まれるCN基やNO₂基は、特に有害な官能基の代表例であり、これらが検出できれば、残留農薬の濃度の目安を知ることができる。CN基やNO₂基は、ピレスロイド系農薬のフェンプロパトリン、カーバメイト系農薬の1-ナフチル-N-メチルカーバメートに含有されている。吸収波長は、CN基＝4.44μm（2250cm⁻¹、伸縮振動）、NO₂基＝6.15μm（1625cm⁻¹、伸縮振動）である。

【0085】

図8に、残留農薬測定器の測定系を示す。残留農薬測定器80は、レーザ光出射部80Aとレーザ光検出部80Bとからなる。各々の先端に設けた光ファイバ81、82により、農作物からなる被測定体83に光を出射し、その散乱光をレーザ光検出部80Bにて検出する。レーザ光検出部80B内部に設けた検出器には、HgCdTeディテクタとPbSeディテクタを使用する。レーザ光出射部80Aに含まれるレーザ光源は、適度な温度調整の下、素子長10mm、周期Λ＝26μmのLiNbO₃結晶導波路を用いる。一方の半導体レーザの波長は、0.91μm帯とし、他方の半導体レーザの波長は、1.30～1.65μm帯で可変とした。

【0086】

被測定体のリングの表皮にフェンプロパトリンおよび1-ナフチル-N-メチルカーバメートを塗布し（濃度1%）、これに出力10mWの中赤外光を照射する。その結果、波長2.22μmにおいてCN基の倍音吸収を、波長3.08μmにおいてNO₂基の倍音吸収を十分観測することができる。実施例8により、残留農薬の検出においても、1つの周期ΛからなるLiNbO₃結晶によって複数の官能基の存在を確認することができる。

【0087】

なお、検出すべき官能基がNO₂基だけであれば、その他の利点も示すことができる。すなわち、LiNbO₃結晶導波路の周期Λ＝27μmとするならば（周期Λ＝26μmでもよいが、効果の大きさを示すべく周期Λ＝27μmで議論する）、実施例4で説明したように、検出体の吸収波長が3.0μmを少し超えた領域だと、使用する半導体レーザ双方に対しての波長安定性が向上する。半導体レーザの端面の反射膜と光ファイバのファイバブラッググレーティングとを取り除いた光学系を用いても、十分なNO₂基の倍音吸収を観測することができる（なお、この効果は、上述のNO₂ガスの検出においても同様に見られる）。

【図面の簡単な説明】

【0088】

【図1】周期Λと仮定し、波長λ₃を助変数として求めた3dB領域を示す図である。

【図2】周期Λ＝27μm、波長λ₁＝1.064μmとした時の波長λ₂に対する規格化変換効率η/η₀を示す図である。

【図3】本発明の一実施形態にかかる中赤外光を発生するレーザ光源を示すブロック図である。

【図4】実施例1における3dB領域を示す図である。

【図5】実施例1において出力された中赤外光の偏波依存性を示す図である。

【図6】本発明の一実施形態にかかる光吸収分析装置を示すブロック図である。

【図 7】実施例 7 にかかる 2 波長差分吸収ライダーの測定系を示す図である。

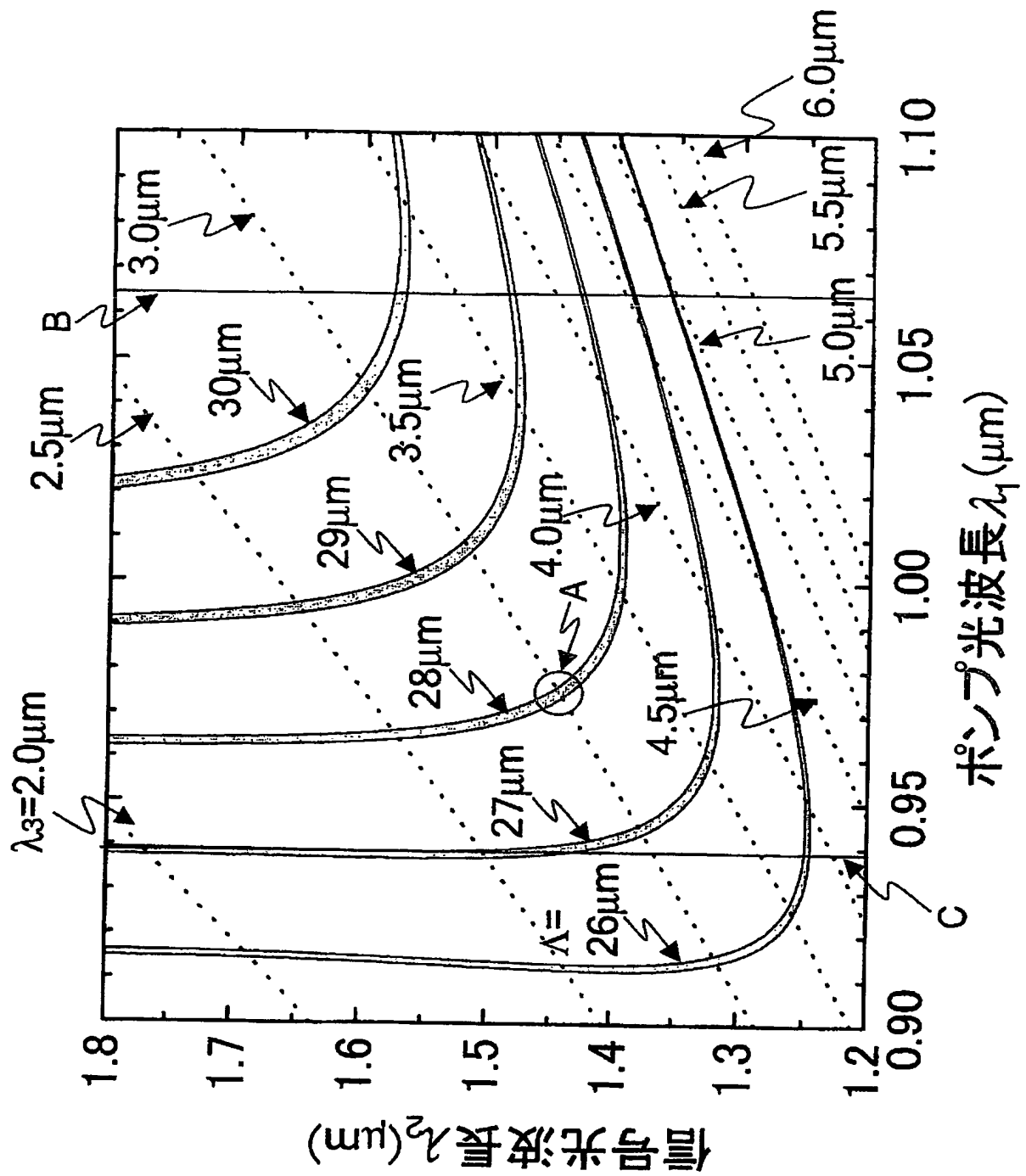
【図 8】実施例 8 にかかる残留農薬測定器の測定系を示す図である。

【符号の説明】

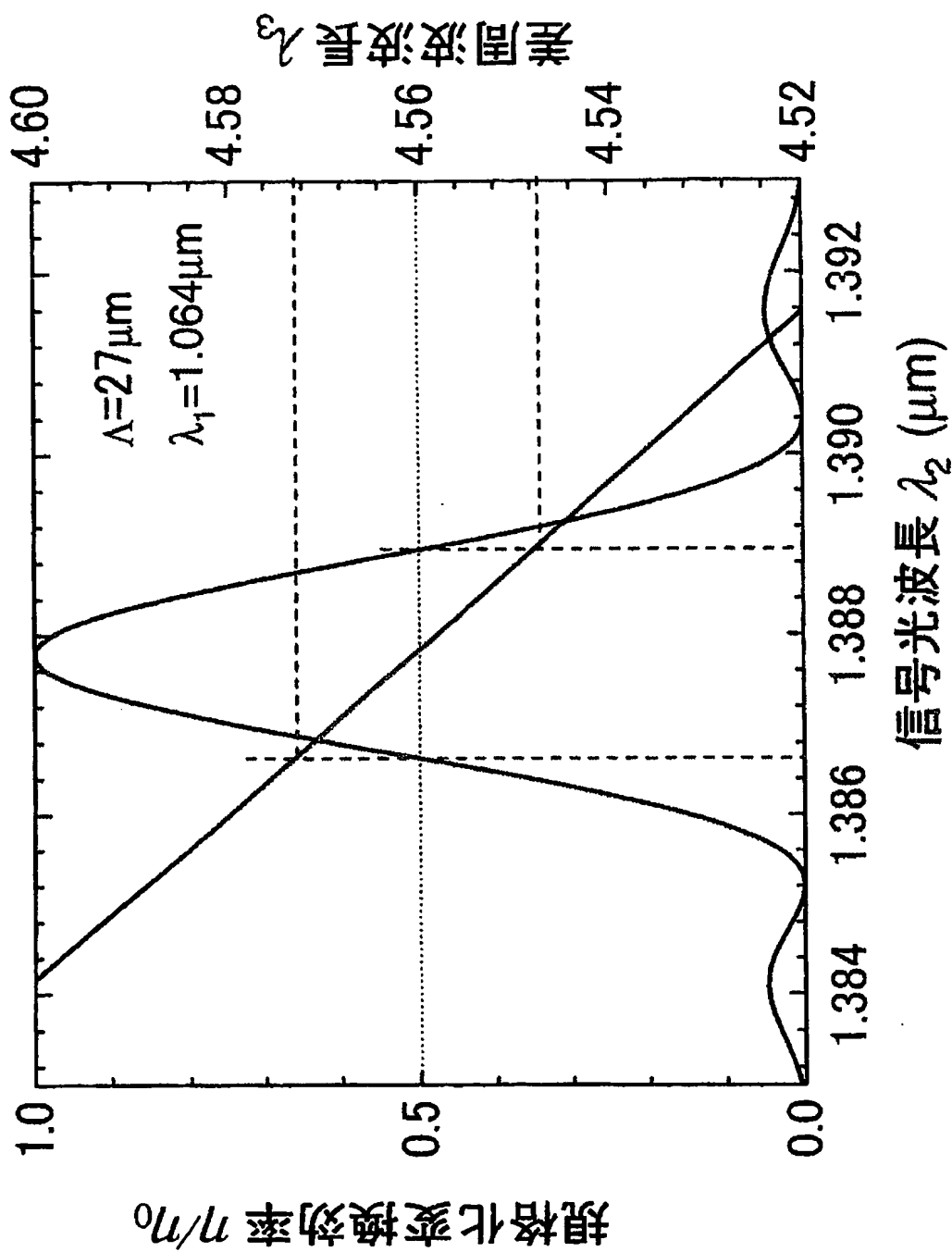
【0089】

- 10, 11, 30, 31 半導体レーザー
- 12~15, 20, 22, 24, 32~35, 40, 42 結合レンズ系
- 16, 17, 36, 37 偏波面保持ファイバ
- 19, 23, 43, 81, 82 光ファイバ
- 18, 38 合波器
- 21, 41 LiNbO₃ 結晶バルク
- 25 分光器
- 44 ガスセル
- 45, 47 ポンプ
- 46 ガス除去管
- 48 ガス排気管
- 49, 63 検出器
- 60 二波長差分吸収ライダー
- 61 レーザ出射口
- 62 反射鏡
- 64 出射光
- 65 散乱光
- 66 検出ガス
- 80 残留農薬測定器
- 83 被測定体

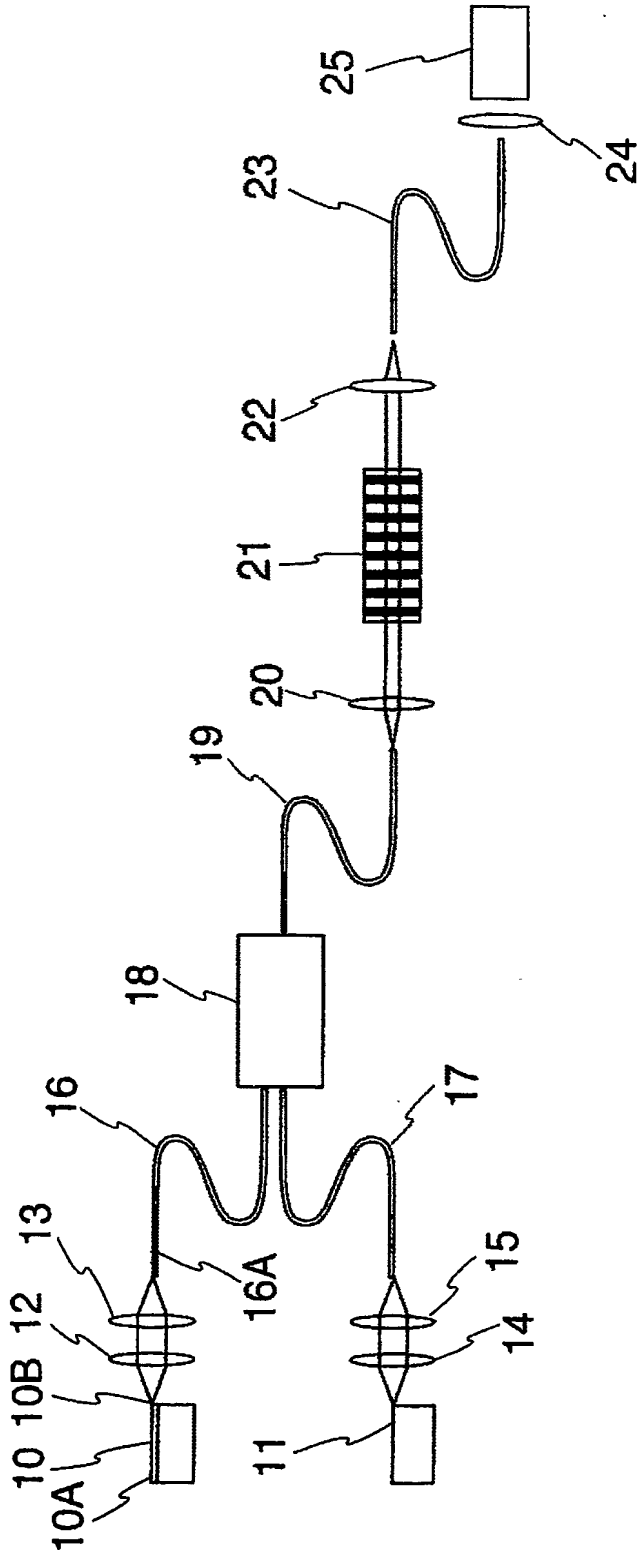
【書類名】図面
【図 1】



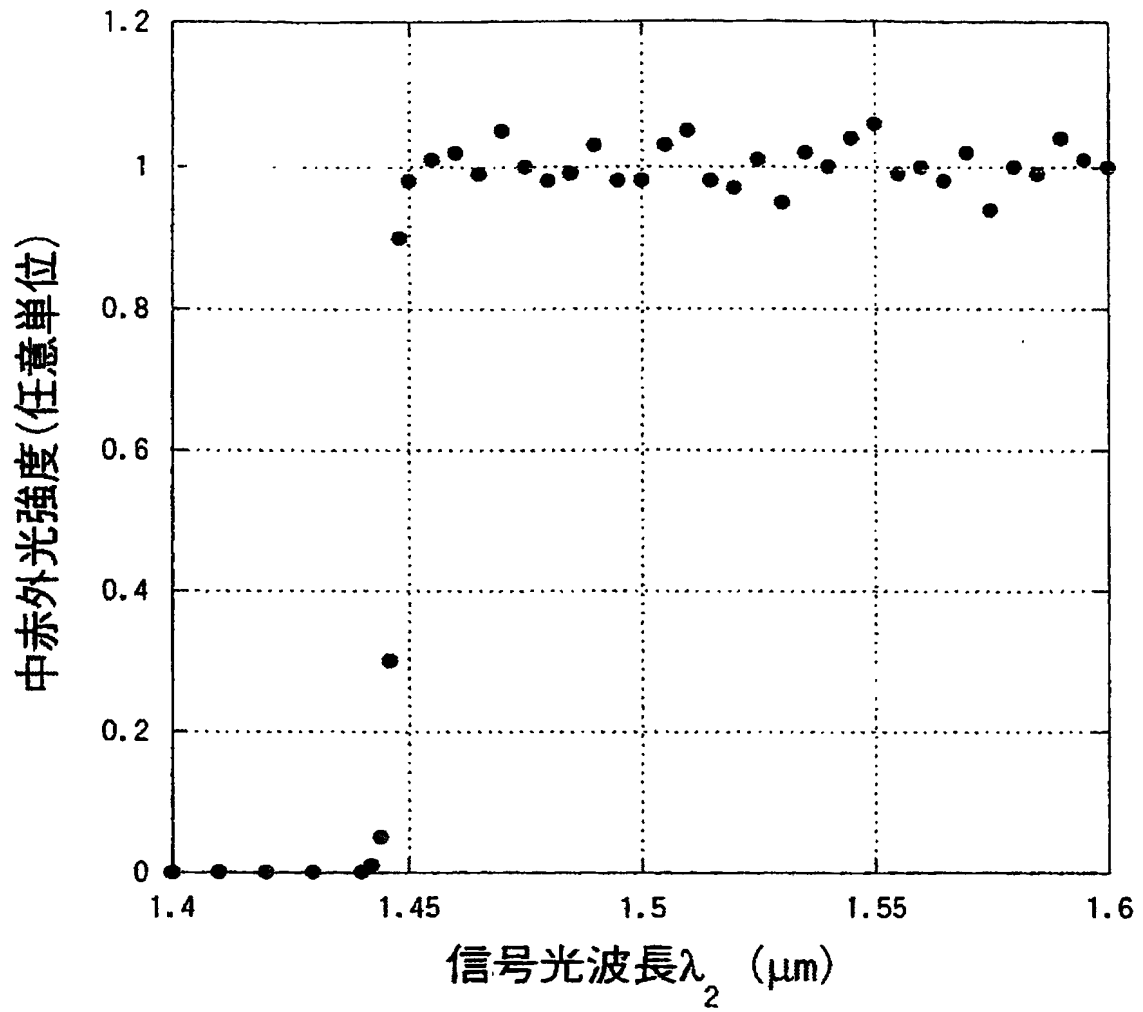
【図 2】



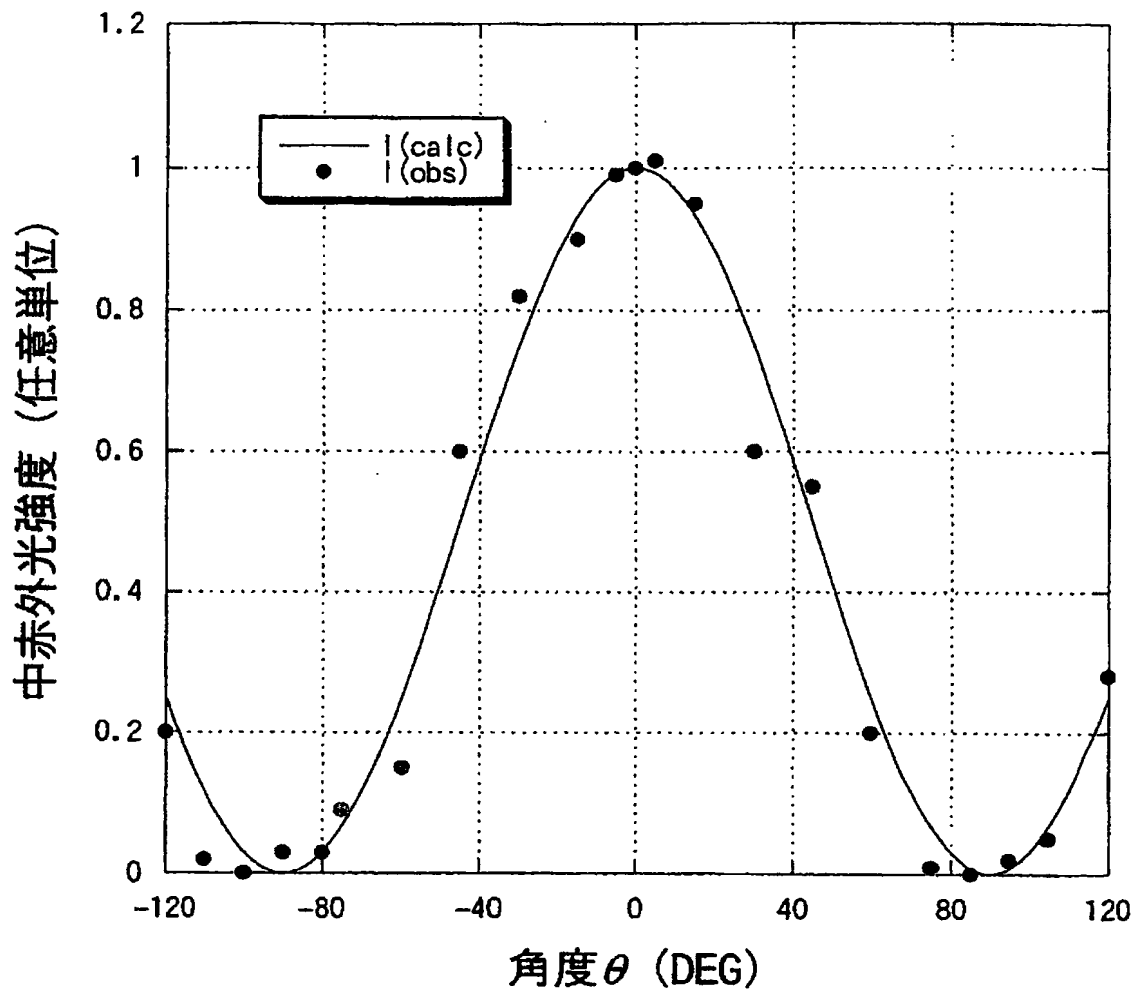
【図 3】



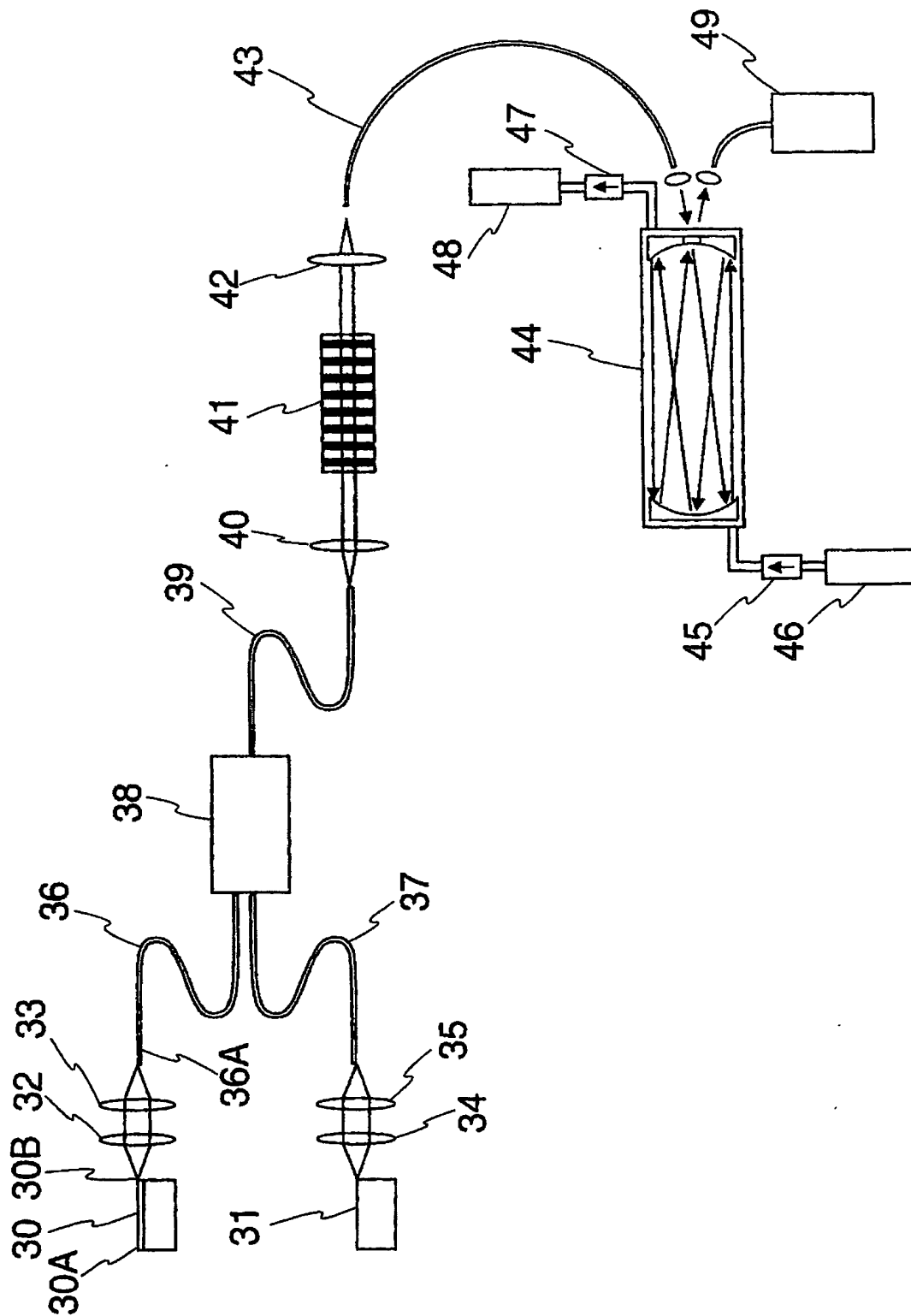
【図 4】



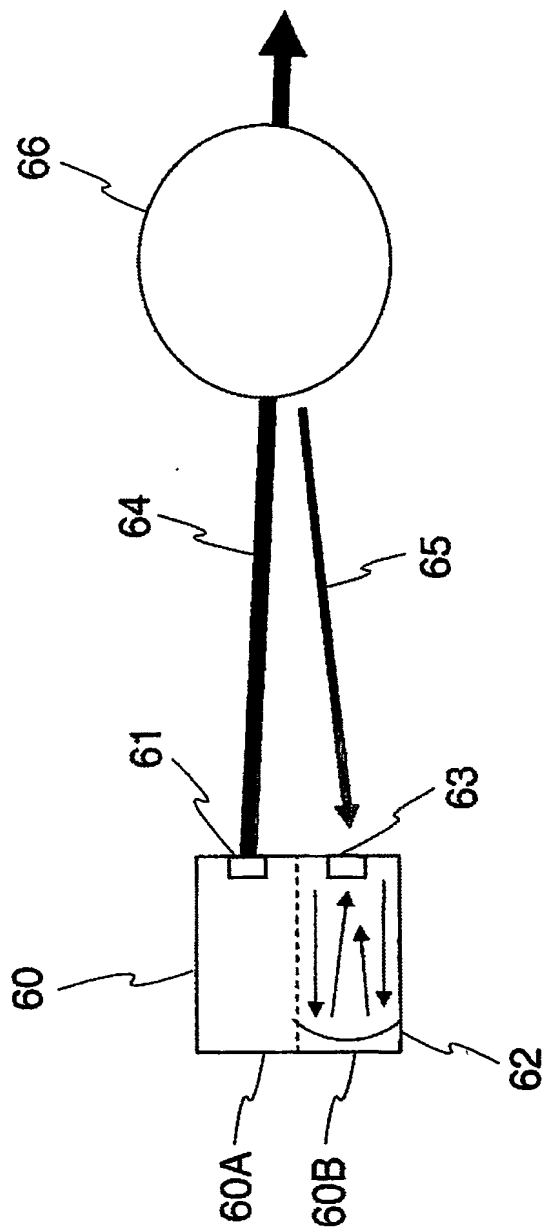
【図 5】



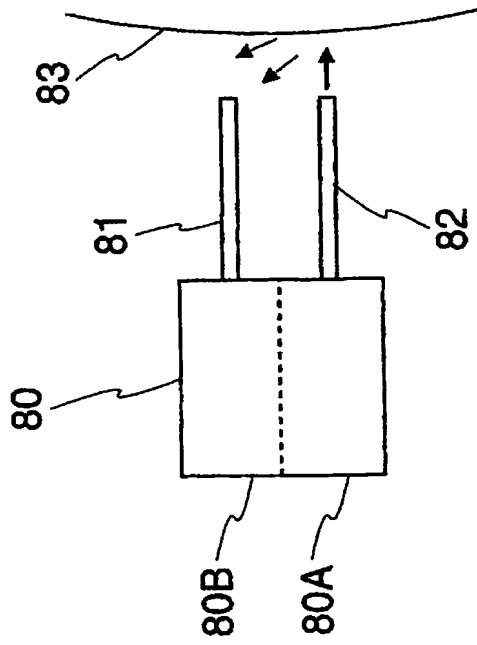
【図 6】



【図 7】



【図 8】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 中赤外領域のレーザー光を波長 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ の範囲において可変することができるレーザー光源を提供する。

【解決手段】 波長 λ_1 のレーザー光を発生する第1のレーザー10と、波長 λ_2 のレーザー光を発生する第2のレーザー11と、波長 λ_1 のレーザー光と波長 λ_2 のレーザー光とを入力し、 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ の関係にある差周波の波長 λ_3 を有するコヒーレント光を出力する非線形光学結晶21とを含むレーザー光源において、波長 λ_1 は $0.9 \sim 1.0 \mu\text{m}$ であり、非線形光学結晶は、1の周期の分極反転構造を有し、波長 λ_2 が $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ の間で変化すると、差周波の波長 λ_3 は、波長 $3.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ の間で変化する。

【選択図】 図3

特願 2 0 0 3 - 3 7 7 3 5 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 4 2 2 6]

1. 変更年月日	1 9 9 9 年 7 月 1 5 日
[変更理由]	住所変更
住 所	東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号
氏 名	日本電信電話株式会社